网络出版时间:2025-07-18 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.01.009

色季拉山急尖长苞冷杉种群径向生长对气候的分异响应

贾玉琪[1a,2],于德水[3],任毅华[1a,4],赵国庆[1b],周彭浩[1a,5],赵迎霞[1a,6]

(1 西藏农牧学院 a 高原生态研究所,b 资源与环境学院,西藏 林芝 860000;2 西藏高原森林生态教育部重点实验室,西藏 林芝 860000;3 白山市林业科学院,吉林 白山 134300;4 林芝生态监测站,西藏 林芝 860000;5 西藏高寒植被生态安全重点实验室,西藏 林芝 860000;6 西藏林芝高山森林生态系统国家野外科学观测研究站,西藏 林芝 860000)

[摘 要] 【目的】分析色季拉山急尖长苞冷杉群落对气候变化的响应,探讨不同海拔急尖长苞冷杉林适应全球气候变暖的异同。【方法】以色季拉山优势树种急尖长苞冷杉种群为研究对象,利用树木年代学的方法,结合 TASP-Win 及 ARSTAN 程序建立 4 个海拔梯度(3 700,3 900,4 100 和 4 300 m)急尖长苞冷杉的树轮宽度标准年表,采用回归分析和 Pearson 相关分析探究气温突变前后树木径向生长的变化趋势及其与气温和降水量的相关性。【结果】色季拉山气温突变的分界点为 1985 年,急尖长苞冷杉径向生长趋势对气温突变的响应存在明显分异现象,即不同海拔地区树木的径向生长对气温的响应发生了变化。气温突变前,各海拔梯度的树木径向生长主要受最低气温限制,3 700 m 区域与当年 7 月最低气温呈极显著负相关,4 100 m 区域与前一年 8 月最低气温呈显著负相关;气温突变后,急尖长苞冷杉径向生长受最高气温的促进作用明显,较低海拔(3 700 和 3 900 m)区域与前一年和当年 7—8 月最高气温呈显著正相关,较高海拔中 4 300 m 区域与前一年 10 月和 12 月最高气温呈极显著正相关,4 100 m 区域虽然仅与当年 5 月最高气温显著负相关,但却不再受到最低气温的限制。气温突变前,3 700 和 3 900 m 区域急尖长苞冷杉径向生长不受降水限制,4 100 m 区域与当年 4 月降水量呈正相关,4 300 m 区域与当年 7 月降水量呈正相关;气温突变后,3 700 m 区域与当年 8 月及前一年 8 月和 10 月降水量呈负相关,4 100 m 区域与降水量不相关。【结论】气温升高可促进高海拔区域急尖长苞冷杉的生长,并提高其生长适应区海拔高度;同时,气候变化导致急尖长苞冷杉径向生长出现分异现象。

[关键词] 升温突变;径向生长;海拔梯度;急尖长苞冷杉;色季拉山

[中图分类号] S791.14 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)01-0087-12

Divergent response of radial growth to temperature and precipitation in a population of *Abies georgei* var. *smithii* in the Sygera Mountains

JIA Yuqi[1a,2], YU Deshui[3], REN Yihua[1a,4], ZHAO Guoqing[1b], ZHOU Penghao[1a,5], ZHAO Yingxia[1a,6]

(1 a *Institute of Xizang Plateau Ecology*, b *College of Research and Environment*, *Xizang Agricultural and Animal Husbandry University*, *Nyingchi*, *Xizang* 860000, *China*; 2 *Key Laboratory of Forest Ecology in Xizang Plateau*, *Ministry of Education*, *Nyingchi*, *Xizang* 860000, *China*; 3 *Baishan City Academy of Forestry Sciences*, *Baishan*, *Jilin* 134300, *China*; 4 *Linzhi National Forest Ecosystem Observation & Research Station of Xizang*, *Nyingchi*, *Xizang* 860000, *China*; 5 *Key Laboratory of Alpine Vegetation Ecological Security in Xizang*, *Nyingchi*, *Xizang* 860000, *China*; 6 *Linzhi National Forest Ecosystem Observation & Research Station of Xizang*, *Nyingchi*, *Xizang* 860000, *China*)

[收稿日期] 2024-08-07 [修回日期] 2024-09-30
[基金项目] 国家自然科学基金项目(32371651);西藏高原森林生态教育部重点实验室研究生创新计划项目(XZAJYBSYS-202412)
[作者简介] 贾玉琪(1994—),女,四川乐山人,在读硕士,主要从事森林生态学研究。E-mail:xz_jyq@163.com
[通信作者] 任毅华(1980—),男,陕西西安人,副教授,硕士生导师,主要从事森林生态学研究。E-mail:xz_ryh@163.com

Abstract:【Objective】The study aimed to analyze the response of *Abies georgei* var. *smithii* (Smith fir) communities in the Sygera Mountains to climate change and to explore the similarities and differences in their adaptation strategies to global warming at different altitudes.【Method】Dendrochronological methods were applied to *A. georgei* var. *smithii* communities across four altitudinal gradients (3 700,3 900, 4 100,and 4 300 m) in the Sygera Mountains. Standardized tree-ring width chronologies for the four altitudinal gradients were developed through the integrated application of TASP-Win and ARSTAN software. Regression analysis and Pearson correlation analysis were adopted to investigate the trends in tree radial growth before and after the abrupt temperature change,and assess the correlations of the tree-ring width index with temperature and precipitation.【Result】The abrupt temperature change in Sygera Mountain was identified with a threshold year of 1985. The radial growth response of *A. georgei* var. *smithii* to this climatic shift exhibited significant altitudinal divergence,reflecting altered temperature-growth relationships across altitudes. Before the abrupt temperature change,the radial growth across all elevations exhibited primary constraints from minimum temperatures:the 3 700 m site displayed a highly significant negative correlation with July minimum temperatures of the current year,while the 4 100 m site showed a significant negative correlation with August minimum temperatures of the preceding year. After the abrupt temperature change,radial growth of *A. georgei* var. *smithii* was enhanced by maximum temperatures. At lower elevations (3 700 m and 3 900 m),radial growth demonstrated significant positive correlations with maximum temperatures during July—August of both the current and the preceding years. The higher elevation site (4 300 m) exhibited highly significant positive correlations with October and December maximum temperatures of the preceding year. Notably,the 4 100 m site transitioned to a significant negative correlation with May maximum temperatures of the current year,no longer showing minimum temperature limitations. Prior to the abrupt temperature change,radial growth at 3 700 m and 3 900 m was not enhanced by precipitation,whereas the 4 100 m and 4 300 m sites correlated positively with April and July precipitation of the current year,respectively. After the abrupt temperature change,the 3 700 m area was negatively correlated with August precipitation of the current year and August and October precipitation of the previous year,while the 4 100 m area was not correlated with the precipitation.【Conclusion】Climate warming enhances radial growth of *A. georgei* var. *smithii* at higher elevations,driving an upward shift in its growth acclimatization zone. Concurrently,climate change has induced elevational divergence in the radial growth of *A. georgei* var. *smithii*.

Key words: abrupt warming; radial growth; altitudinal gradient; *Abies georgei* var. *smithii*; Sygera Mountains

全球气候变暖已是不争的事实,20世纪90年代,D'ARRIGO等[1]发现气候变化导致树木径向生长与气候因子之间的关系存在不稳定性,并在此基础上提出"分异现象"的概念,从而打破了人们对"均一性"原理的认识[2]。"生长-气候的分异响应"是指树木径向生长与气候因子之间的相关性随时间、空间或树种而发生变化,导致原本稳定的响应模式出现波动或不一致性的现象[3]。关于分异现象的研究有利于揭示全球气候变化下树种的生态适应性和进化潜力,深刻了解树木生长与气候因子之间的复杂关系。因此,自其概念提出后就备受生态学家们的广泛关注,并在更多研究中被证实。如:随着气温的升高,俄罗斯阿巴拉契亚山脉林线处的西伯利亚落叶松(*Larix sibirica*)径向生长受到6—7月平均气温上升的促进影响,而低海拔区域的树木生长则主要受到来自蒙古干旱气团的限制影响[4];原本快速生长的阿拉斯加白云杉(*Picea glauca*)群落随着气候变暖,其生长表现出下降的趋势[5]。一般认为,分异现象的产生是因为气候变化改变了树木生存区域环境的温度和降水模式,从而引发树木生长适应性的转变,这种转变可能会降低树木对气候变化的敏感性,抑制其径向生长,进而影响森林生态系统的结构与功能[6-9]。但由于分异现象受树种、地形、海拔、气象等多环境因素的综合影响,其结果呈现往往具

有一定的复杂性和不确定性，只有扩大相关树木年轮数据库，通过增加更多的样本和数据点，才能更好地理解不同环境条件下树木生长的规律，从而为树木生长模型提供更加丰富和多样化的参考依据，并更准确地预测和重建历史气候变化。

海拔作为一个复合环境因子，可对水分、热量、土壤养分等进行重新分配，进而影响树木径向生长与气候因子之间的关系。通常认为树木径向生长在高海拔地区受温度限制，在低海拔地区受水分限制[10]，但这一结论并非绝对。如在青藏高原的都兰地区，无论海拔高低，祁连圆柏（*Juniperus przewalskii*）的径向生长都受到生长季降水的限制[11]；在秦岭，巴山冷杉（*Abies fargesii*）的径向生长在中、低海拔受当年早春和夏季温度的限制，在高海拔区域则受当年夏季降水限制[12]。可见，同一树种在不同海拔，其径向生长对气候变化的响应存在显著差异。

青藏高原是全球公认对气候变化最为敏感的地区之一，一直都是全球气候变化研究的热点区域[13]，也是从事树木气候学研究最为理想的区域[14-16]。色季拉山位于青藏高原东南部，属念青唐古拉山脉，山脉的隔绝孕育出了藏东南地区独特的生态系统。急尖长苞冷杉（*Abies georgei* var. *smithii*）又名乌蒙冷杉，是我国特有树种，主要分布于藏东南、滇西北部及川西南部等地 3 600～4 300 m 的高山地带[17]。急尖长苞冷杉作为藏东南亚高山暗针叶林的建群树种之一，对于水源养护、土壤固持以及生物多样性维护等起着至关重要的作用，对于藏东南乃至青藏高原生态安全屏障的构建具有重要意义。近年来，急尖长苞冷杉群落在全球气候变化背景下的动态特征受到学术界的广泛关注，如 LIANG 等[18-19]对急尖长苞冷杉林线位置的变化进行分析，开发了林线处 4 个急尖长苞冷杉年轮宽度表，并据此重建了西藏东南部自 1765 年以来的气候变化；另外在急尖长苞冷杉生长阈值[20]、径向生长对气候变化的响应[21]方面也开展了大量研究。这些研究为预测气候变化背景下急尖长苞冷杉的生长规律和分布动态变化等，奠定了坚实的理论基础。基于此，本研究采用树木年轮学的方法，对藏东南天然急尖长苞冷杉种群在气温突变前后径向生长产生的分异现象进行讨论，深入探究西藏色季拉山急尖长苞冷杉种群对气候变暖的适应性机制，以期在当前研究结果的基础上，进一步探索急尖长苞冷杉在更广泛环境条件下的生长模式，并开发更精确的模型来预测其在未来气候变化情景下的生长动态。

1　研究区概况

色季拉山位于西藏东南部林芝县境内（29°10′～30°15′N，93°12′～95°35′E），属念青唐古拉山脉，其走向大致从西北向东南延伸，海拔高差 3 200 m（2 100～5 300 m），属于湿润山地暖温带和半湿润山地温带气候，植被垂直分布明显[22]。研究地位于色季拉山东坡（阴坡），年平均气温 －0.73 ℃，全年最低温在 1 月（月均 －13.8 ℃），最高温在 7 月（月均 9.8 ℃）。降水量主要集中在 6－9 月，年均降水量 1 134 mm，年均相对空气湿度 78.8%[23]。土壤为棕壤，偏酸性，石砾较多。研究区主林层为急尖长苞冷杉纯林，林下有少量的西南花楸（*Sorbus rehderiana*）和七角枫（*Acer palmatum*）等小乔木树种；林下灌木层主要有硬毛杜鹃（*Rhododendron hirtipes*）、薄毛海绵杜鹃（*Rhododendron agganniphum* var. *schiaopeplum*）、雪层杜鹃（*Rhododendron nivale*）、杯萼忍冬（*Lonicera tangutica*）等。

2　研究方法

2.1　急尖长苞冷杉树芯样本的采集

2023 年 11 月，在色季拉山东坡（阴坡）急尖长苞冷杉林内，按 200 m 海拔梯度（3 700，3 900，4 100 和 4 300 m）设置 4 个 20 m×100 m 样带，记录样带基本信息（图 1）。根据国际树木年轮数据库的标准，在每个样带内选择生长良好且个体间距较远的孤立木（排除非气候因子对树木的影响），用直径为 5.15 mm 的生长锥，在树木胸径处沿垂直于坡向和平行于坡向的 2 个方向分别钻取样芯。剔除芯腐和未钻到髓心的样芯，将采集的合格样芯放入塑料管并编号，统一带回实验室。

2.2　急尖长苞冷杉树轮宽度年表的建立

用白乳胶将样芯固定于特制木槽内，待自然风干后，依次使用规格为 240＃、400＃和 600＃的砂纸打磨抛光，直至可清晰分辨树木的早晚材界线为止。使用 LintabTM6.0 树轮宽度测量仪（精度 0.01 mm）测量树轮宽度。使用 COFFCHA 程序对树轮宽度数据进行检验，利用 TASP-Win 程序进行交叉定年，根据交叉定年结果，对伪轮和缺轮进行修正[24]。由于树轮序列可能包含树木自身的生长趋势，本研究采用 ARSTAN 程序对样芯进行标准化处理，采用步长为 0.6 的样条函数进行拟合，去除气候因子以外的影响因素[25-26]，最终建立了色季拉山 4 个海拔样带下急尖长苞冷杉的树轮宽度标准年表

(包括年轮宽度指数)。表 1 显示,4 个样带标准年表的样本总体代表性均高于树木年轮分析总体代表性阈值 0.85,标准差、平均敏感度和信噪比均较高,说明急尖长苞冷杉的标准年表包含了较多的气候信息,且对气候变化存在一定的敏感性,有利于进行树木年轮学分析;一阶自相关系数为 0.464～0.830,说明急尖长苞冷杉更容易受前一年气候因子的影响,具有明显的"滞后效应"。总体而言,标准年表具有较高的高频信息[27-29],4 个样带的树轮宽度年表统计特征值表明年表质量较高,可以满足与气候因子关系分析的要求,因此本研究利用树轮序列的标准年表进行后续分析。

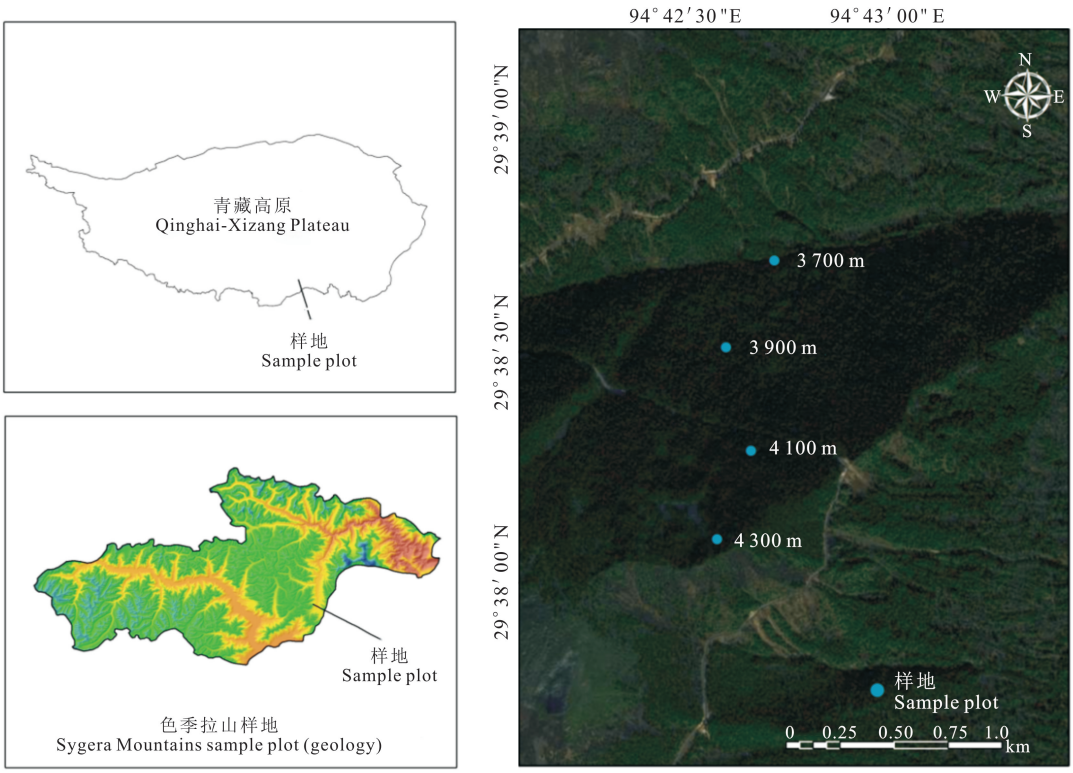


图 1 研究区位置和样点分布

Fig. 1 Location of the study area and distribution of sample plots

表 1 急尖长苞冷杉不同海拔树轮宽度年表的统计参数及公共区间分析

Table 1 Statistical parameters and public interval analyses of tree-ring width chronologies for *Abies georgei* var. *smithii* across elevation gradients

海拔/m Elevation	样本量(树/芯) Sample size (Tree/series)	时间跨度 Time span	样本代表性 Express population signal	标准差 Standard deviation	第 1 主成分/% First principal component	平均敏感度 Mean sensitivity	信噪比 Signal-to-noise ratio	一阶自相关系数 First-order autocorrelation coefficient
3 700	15/24	1860－2022	0.917	0.195	52.7	0.161	14.58	0.464
3 900	20/36	1804－2022	0.904	0.220	36.2	0.170	26.93	0.564
4 100	17/32	1645－2022	0.894	0.365	48.7	0.159	12.14	0.830
4 300	16/30	1717－2022	0.939	0.227	44.5	0.169	28.47	0.609

2.3 气象数据的获取

气象数据选取距离采样点最近的西藏林芝高山森林生态系统国家野外科学观测研究站的资料,海拔 3 800 m;对于研究站缺失的部分数据,借助中国气象局国家气象科学数据网站进行补充(http://data.cma.cn/)。系统整理了 1961－2020 年的月均温、月最低气温、月最高气温及月平均降水量等气候变量。选用 Mann-Kendall(M-K)非参数统计检验法检验年平均气温的突变点及突变年份[30]。由于树木受到"滞后效应"的影响,因此在数据分析时,选取了前一年 7 月至当年 12 月(共 18 个月)的气象数据,并依照海拔每升高 100 m 气温降低 0.6 ℃的规律对气象数据进行修正[27]。将修正后数据与气象局监测数据进行比对,并利用 SPSS Statistics 25 中的 Pearson 相关性进行检验($P<0.05$),结果显示数据符合研究允许误差。

2.4　数据分析

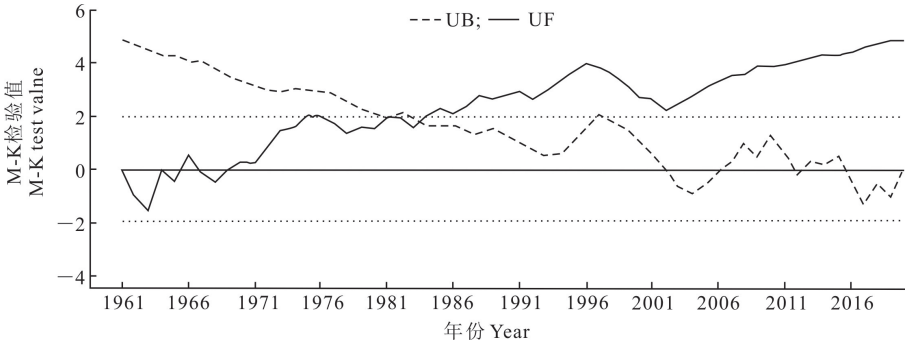
采用 SPSS 25 分别计算急尖长苞冷杉树轮宽度指数与气候因子的 Pearson 相关系数，并结合 bootstrap 进行 1 000 次自动抽样检测。用 Arcgis10.8.1 和 Origin2021 软件绘图。

3　结果与分析

3.1　气温突变前后不同海拔急尖长苞冷杉径向生长趋势的差异

对色季拉山年平均气温做突变性检验（图 2），可知 1985 年是研究区气温变化的明显分界点，故本研究选取 1961－1985 年（气温突变前）和 1985－2020 年（气温突变后）2 个时间段，分别进行急尖长苞冷杉径向生长与气候因子的相关性分析。

由图 3 可以看出，色季拉山年平均气温以 0.14 ℃/10 a 的速度上升；年平均最高气温以 0.12 ℃/10 a 的速度上升；年平均最低气温在气温突变前以－0.14 ℃/10 a 的趋势下降，在气温突变后以 0.18 ℃/10 a 的速度上升；年降水量在气温突变前以 12.43 mm/10 a 的趋势增加，在气温突变后以 61.42 mm/10 a 的趋势显著增加。



UB. 正向检验值序列 Sequence of forward test values；UF. 反向检验值序列 Sequence of reverse test values

图 2　色季拉山年平均气温 Mann-Kendall 突变性检验结果

Fig. 2　Mann-Kendall mutability test results for annual mean temperature in the Sygera Mountains

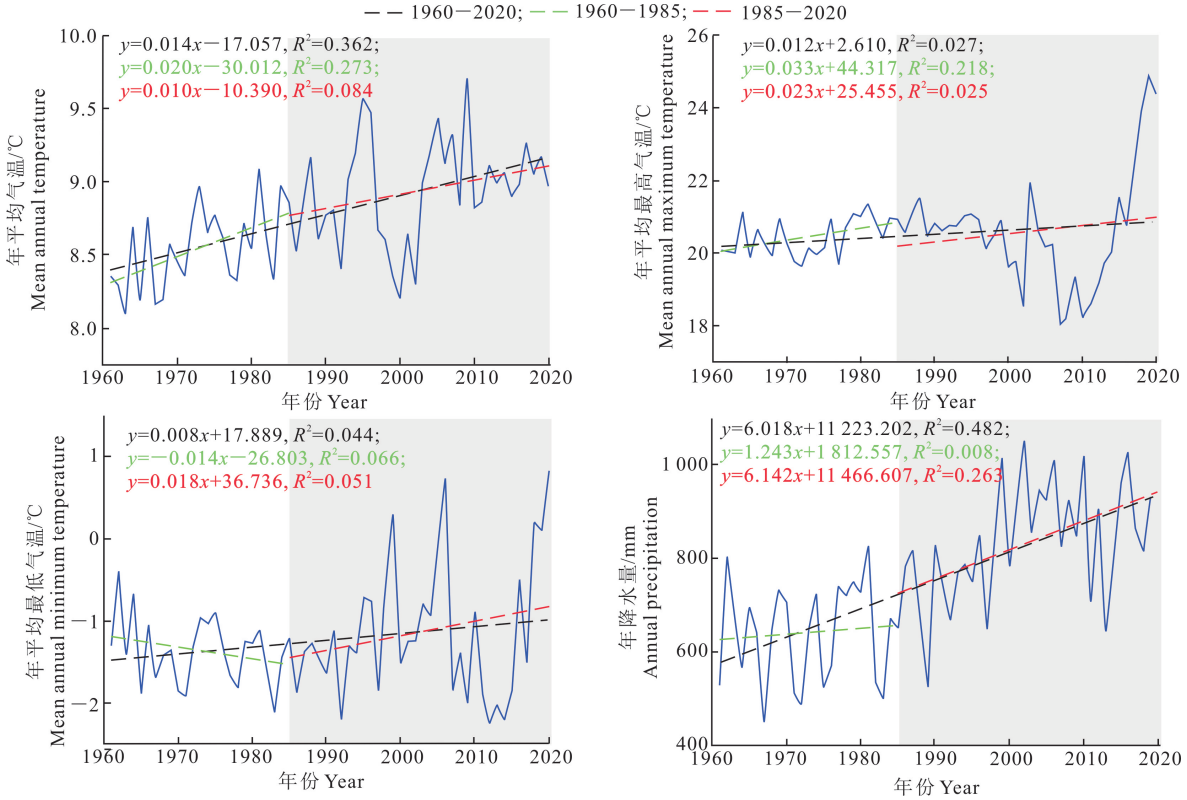


图 3　色季拉山 1960－2020 年平均气温和降水量的年际变化趋势

Fig. 3　Interannual trends in mean temperature and precipitation in Sygera Mountains during 1960－2020

对比色季拉山气温突变前后急尖长苞冷杉径向生长变化趋势(图 4)可知,气温突变前,4 个海拔区域的急尖长苞冷杉径向生长皆呈现上升趋势;气温突变后,不同海拔区域急尖长苞冷杉径向生长发生了明显分异现象,其中海拔 4 100 和 4 300 m 处急尖长苞冷杉径向生长依然表现为总体上升趋势,只是 4 100 m 处生长趋势变化较 4 300 m 变化更为明显,而海拔 3 900 和 3 700 m 区域急尖长苞冷杉的径向生长则表现出下降趋势,以 3 700 m 更为明显。

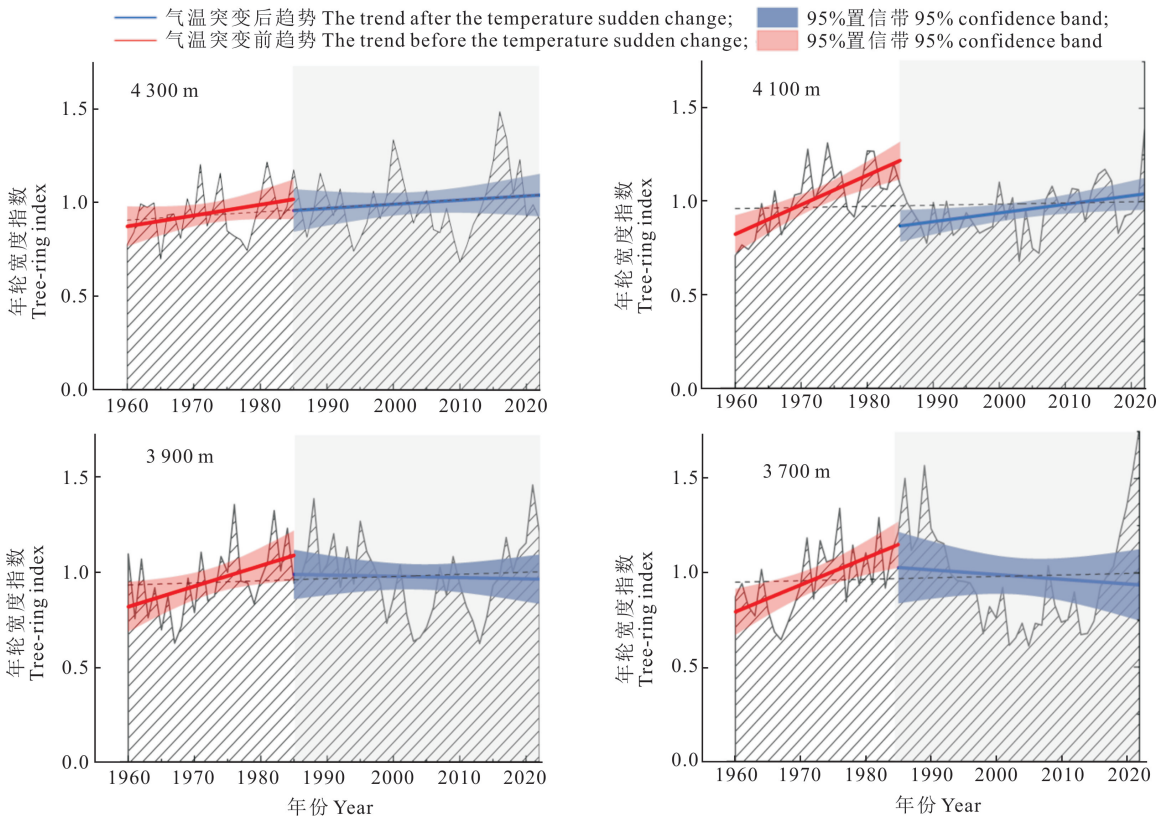


图 4 色季拉山不同海拔急尖长苞冷杉径向生长的年际变化趋势

Fig. 4 Interannual trends in radial growth of *Abies georgei* var. *smithii* at different altitudes in Sygera Mountains

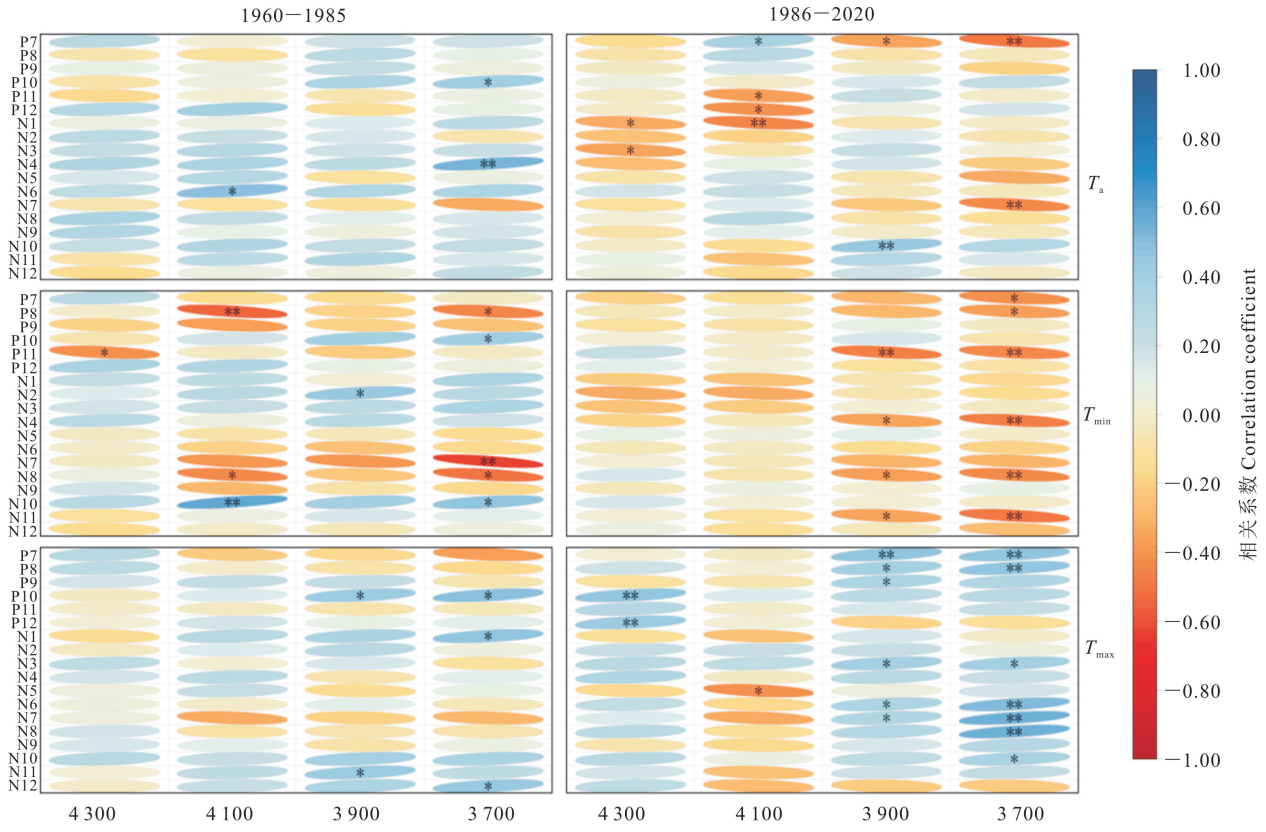
3.2 气温突变前后急尖长苞冷杉径向生长对气温的响应差异

3.2.1 对月平均气温的响应 气温突变前,仅 3 700 m 海拔区域急尖长苞冷杉径向生长与前一年 10 月月均温呈正相关,与当年 4 月月均温呈极显著正相关,4 100 m 区域径向生长与当年 6 月月均温呈显著正相关,而其他海拔区域与月均温并无明显相关性。气温突变后,3 700 m 海拔区域急尖长苞冷杉径向生长与前一年 7 月和当年 7 月月均温呈极显著负相关;3 900 m 海拔区域急尖长苞冷杉径向生长与前一年 7 月月均温呈显著负相关,但与当年 10 月月均温呈极显著正相关;4 100 m 区域急尖长苞冷杉径向生长与前一年 7 月月均温呈显著正相关,与前一年 11,12 月月均温呈显著负相关,与当年 1 月月均温呈极显著负相关;4 300 m 处急尖长苞冷杉径向生长则与当年 1,3 月月均温呈显著负相关(图 5)。无论在气温突变前还是突变后,不同海拔区域急尖长苞冷杉径向生长均受到“滞后效应”的影响,皆会与前一年温度因子呈现一定的相关性。气温突变前后,急尖长苞冷杉径向生长与温度因子之间的关系发生了明显的转变。

3.2.2 对月最低气温的响应 气温突变前,在 3 700 m 区域,急尖长苞冷杉的径向生长受到月最低气温的限制,与前一年 8 月和当年 8 月最低气温呈显著负相关,与当年 7 月最低气温呈极显著负相关,与前一年 10 月及当年 10 月最低气温呈显著正相关;3 900 m 区域急尖长苞冷杉的径向生长与当年 2 月最低气温呈显著正相关;4 100 m 区域的径向生长与前一年和当年 8 月最低气温呈显著负相关,与当年 10 月最低气温呈极显著正相关;4 300 m 区域径向生长与当年 11 月最低气温呈显著负相关。气温突变后,3 700 m 区域急尖长苞冷杉的径向生长与前一年 7,8 和 11 月最低气温呈显著负相关,与当年 4,8 和 11 月最低气温呈显著负相关;3 900 m

区域径向生长也受当年 4，8，11 月最低气温限制并呈显著负相关，与前一年 11 月最低气温呈极显著负相关；4 100 和 4 300 m 区域急尖长苞冷杉径向生长则不再受到最低气温的限制。

3.2.3　对月最高气温的响应　气温突变前，急尖长苞冷杉径向生长在 3 700 m 海拔区域与前一年 10 月和当年 1，12 月最高气温呈显著正相关，3 900 m 区域与前一年 10 月和当年 11 月最高气温呈显著正相关，在 4 100 和 4 300 m 区域则不受月最高气温限制。气温突变后，3 700 m 区域急尖长苞冷杉径向生长与前一年 7，8 月和当年 3，6，7，8，10 月最高气温呈显著正相关，在 3 900 m 海拔区域与前一年 7，8，9 月和当年 3，6，7 月最高气温呈显著正相关，在 4 100 m 海拔区域与当年 5 月最高气温呈显著负相关，在 4 300 m 海拔区域与前一年 10 和 12 月最高气温呈显著正相关。



左侧代码 P 表示前一年，N 表示当年，P7 表示前一年 7 月，N1 表示当年 1 月，其余依此类推；

图中 * 表示相关性显著（$P<0.05$），* * 表示相关性极显著（$P<0.01$）；图 6 同。

T_a. 月平均气温；T_{min}. 月最低气温；T_{max}. 月最高气温。

The codes P on the left represents the previous year, N represents the current year, P7 represents July of the previous year, N1 represents January of the current year, and the same as for the rest; * in the figure indicates significant correlations ($P<0.05$) and * * indicates highly significant correlations ($P<0.01$); The same as in Fig. 6.

T_a. Mean monthly temperatures; T_{min}. Monthly minimum temperatures; T_{max}. Monthly maximum temperatures.

图 5　色季拉山气温突变前后急尖长苞冷杉径向生长与气温的相关性分析

Fig. 5　Temperature-growth correlations of *Abies georgei* var. *smithii* before and after the abrupt temperature change in Sygera Mountains

3.3　气温突变前后急尖长苞冷杉径向生长对水分的响应差异

气温突变前，急尖长苞冷杉径向生长仅在 4 100 m 海拔区域与当年 4 月降水量呈显著正相关，在 4 300 m 海拔区域与当年 7 月降水量呈显著正相关。但在气温突变后，4 100 m 区域急尖长苞冷杉的径向生长则不受降水量的限制，在 3 700 m 区域与前一年 8，10 月和当年 8 月降水量呈显著负相关，在 3 900 m 区域与当年 1，10 月降水量分别呈显著正相关和负相关，在 4 300 m 区域与前一年 10 月降水量呈显著负相关（图 6）。气温突变前，不同海拔区域急尖长苞冷杉通常不受到水分因子的限制；但在气温

突变上升后,急尖长苞冷杉径向生长与降水量的相关性同气温因子一样明显加强。

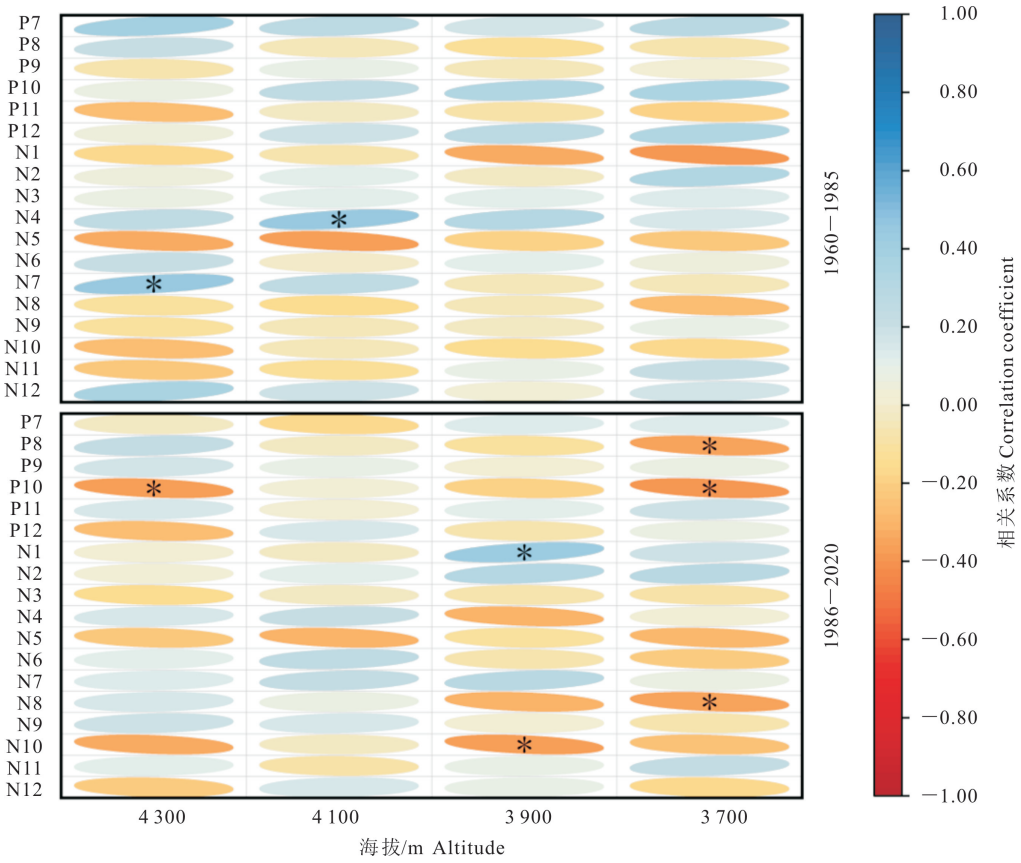


图 6 色季拉山气温突变前后急尖长苞冷杉径向生长与降水量的相关性分析

Fig. 6 Precipitation-growth correlations of *Abies georgei* var. *smithii* before and after the abrupt temperature change in Sygera Mountains

4 讨 论

4.1 不同海拔梯度急尖长苞冷杉径向生长趋势差异

青藏高原作为世界屋脊,是气候变化最敏感和气候变暖最明显的区域之一[31]。经分析,色季拉山气温在 1985 年后开始发生突变,这与蔡苗等[32]的研究结果相似。以 1985 年作为林芝市气温突变的节点,色季拉山急尖长苞冷杉种群径向生长因气温突变而发生了明显分异,3 700 和 3 900 m 海拔区域径向生长速度开始呈现下降趋势,而 4 100 和 4 300 m 海拔区域生长速度则呈上升趋势。色季拉山急尖长苞冷杉种群对气温突变的这一响应规律与珠穆朗玛峰地区的喜马拉雅冷杉(*Abies spectabilis*)种群[33]和长白山的红松(*Pinus koraiensis*)种群[34]相似,究其原因可能是因为高海拔地区的树木生长多受限于气温,而低海拔地区则多受限于水分[35-36]。对于较低海拔区域,气温升高可能导致土壤水分蒸发速率加快以及树木自身蒸腾速率增强[37],从而降低土壤水分含量和树木水分利用效率[38],并进一步影响树木生长。此外,气候变暖还有可能改变树木的生长季,导致生长季提前开始或延迟结束,进而打破树木生长的原有模式,影响其生长速率[39]。对于较高海拔区域,气候变暖提高了高海拔地区的气温,增加了热量补给,可能促进树木的代谢过程,从而对树木径向生长产生积极影响[40]。

虽然“高海拔地区的树木生长多受限于气温、低海拔地区多受限于水分”这一观点已经被学术界所认可,但由于区域环境的复杂性,这一观点并不具有普适性。如关于北亚热带地区巴山松(*Pinus henryi*)的一项研究表明,低海拔地区巴山松的生长主要受到气温的限制,而高海拔地区巴山松的生长则主要受到水分条件的影响[41]。在我国西南高山地区,常绿针叶林和常绿阔叶林水分利用效率的时空格局主要受气温变化的影响[42],但其中处于低海拔地区的树木生长也有可能受到气温限制。这些研究结果充分说明了不同区域、不同树种的生长状况对气候变化响应的复杂性,因此有必要在不同区域,针对主要建群树种开展树木生长与气候变化间的关系研

究，完善相关数据库，以便更加精准地预测气候变化背景下植被未来的变化趋势。

4.2　不同海拔梯度急尖长苞冷杉径向生长对气候突变响应的差异

“树木生长-气候响应分异现象”是树木生长对气候变化响应复杂性的反映，这种现象在全球不同地区的森林生态系统中均有报道[43-45]。目前关于响应“分异问题”的原因解释众多，如温度升高引发的干旱胁迫、“温度阈值假说”、趋势方法使用不当导致的“尾端效应”、人类活动影响“北极变暗”效应等[46-47]。

本研究也观察到了类似的分异现象，对比气温突变前后色季拉山急尖长苞冷杉径向生长与气候因子之间的相关关系，发现气温突变升高后各海拔树轮宽度年表与气候因子的相关性增强，显著相关的月份增加，原本的相关关系也发生了改变，说明色季拉山急尖长苞冷杉对气候变化的响应较为敏感，并产生了分异现象。

在气温突变前，降水量并不是影响急尖长苞冷杉径向生长的主要因子。然而在气温突变后，低海拔区域(3 900 和 3 700 m)树木在生长季的径向生长与多个月份的降水量出现了负相关。在以往的研究中，往往是温度升高而降水量没有显著变化，但因温度升高导致水分蒸发速率加快，致使树木可能面临较大的水分压力，进而影响其径向生长[48]。但通过对色季拉山气象数据的分析可知，气温升高的同时降水量也有显著增加。所以导致急尖长苞冷杉径向生长下降的原因，可能是由于生长季节温度的升高可以增强树木的光合作用，提高树木的生长速率，但是过量的降水容易导致土壤表层积水，使得树木根系长时间处于过湿状态，从而限制根部的氧气供应，这会导致根系功能下降，最终影响树木的整体生长[49]。此外，树木的生长不仅受到降水量的直接影响，还受到降水伴随的环境因素变化的间接影响[50]。例如，降水事件伴随着大气压力的变化、土壤温度的降低以及光照强度的减弱，这些因素都可能间接影响树木的径向生长。特别在某些月份，如 10 月的降水可能会增加霜冻的风险，对树木造成损害；而在树木生长季，如 8 月的大量降水可能影响树木的有氧呼吸，进而抑制其生长。

气温突变后，平均气温对高海拔区域急尖长苞冷杉径向生长的影响较为明显，尤其是与前一年冬季月平均气温呈现显著负相关，可能是因为冬季温暖条件下树木会继续进行一定程度的生长活动，这种非季节性的生长可能会消耗过多的养分储备，从而影响主要生长季树木的径向生长[51]；其次急尖长苞冷杉可能已经适应了特定温度范围内的冬季环境条件，气温突变，特别是冬季气温的升高，可能超出了其适应范围，导致其生理活动受到影响。

气温突变前，急尖长苞冷杉径向生长仅与低海拔区域(3 700 和 3 900 m)冬季月最高气温呈现显著正相关，月最低气温在前一年和当年的 7－8 月显著限制了急尖长苞冷杉的径向生长；有研究表明，低温影响枝条生长从而降低整体生长趋势[52-53]。在气温突变后，4 个海拔区域急尖长苞冷杉的径向生长与气候因子的相关性发生了分异，月最高气温不仅与低海拔区域急尖长苞冷杉径向生长的相关性显著加强，其相关月份也从冬季扩展至整个生长季，同时与高海拔区域树木的径向生长也呈现出了正相关关系。产生这种现象的原因可能是气温升高导致树木生长对温度的响应发生了改变，尤其是在高温阈值被突破后，树木的生长可能会受到更直接的影响。高海拔区域(4 100 和 4 300 m)树木的径向生长不再受到低温限制，这可能是因为温度升高消除了低温对高海拔区域树木生长的限制作用，但并非其生长的促进因素。

导致急尖长苞冷杉径向生长发生分异的主要原因，可能是升温引发的“阈值效应”，树木径向生长存在一个适宜生长的温度阈值范围，其中包括了温度上限和温度下限，一旦超出这个范围，会导致树木生长速率或模式的显著变化[54]。不同海拔区域树木对温度变化的响应存在不同的阈值范围，如 LI 等[20]发现藏东南色季拉山急尖长苞冷杉林树线，木质部分化开始的低温阈值为(0.7±0.4) ℃，远低于温带和寒温带森林木质部分化的最低温阈值(4～5 ℃)；在对川西高原九寨沟弓杠岭林线岷江冷杉的研究中发现，树木径向生长与不同起始温度的初日和终日时间存在相关性[55]。气温突变导致的温度升高对高海拔区域急尖长苞冷杉的径向生长有促进作用，如果温度持续升高，可能会超出该树种的高温阈值范围，从而导致径向生长下降。

同时，还应考虑到树木生长对这些环境因素变化的滞后效应，即树木生长的响应不会立即发生，而是在一段时间后才显现出来。急尖长苞冷杉在气温突变之后即表现出了明显的“滞后效应”，当前年份的生长可能受到前一年气候条件的影响，这种影响在达到一定的阈值后才会变得明显，升温可能会加剧这一效应。例如，高温可能加速蒸腾作用，导致水

分利用效率降低,这种影响可能在干旱条件下的随后年份中更为显著[56]。在对色季拉山急尖长苞冷杉的研究中发现,尽管青藏高原最近200年来持续变暖,但其树线位置并未出现显著变化,这暗示了树线位置波动对气候变化响应的复杂性,包括可能存在滞后效应[26]。这在对长白山区域树木的研究中也有发现,树种为了适应新的温度和降水格局,其分布边界可能会不断改变,但研究结果表明,树种的迁移速度滞后于气候变化速度,表明树种对气候变化的响应存在滞后性[57]。气候变暖对急尖长苞冷杉的影响可能会在不同时间尺度上表现出来,未来在构建模型模拟分析和预测急尖长苞冷杉生长对气候变化的响应时,还应该考虑阈值效应和滞后效应,包括气候变量的阈值和树木生长响应的时间滞后。

5 结 论

本研究利用树木年论学方法,分析了色季拉山4个不同海拔梯度急尖长苞冷杉种群径向生长与气温突变的响应关系,得出以下主要结论:

1)在1985年的升温突变事件前后,不同海拔急尖长苞冷杉的径向生长趋势表现出显著的分异现象,高海拔区域树木的径向生长对升温受益更多,低海拔区域树木的径向生长则受到升温所导致的降雨量增加的负面影响。

2)随着气温的持续升高,不同海拔急尖长苞冷杉径向生长与气温和降水的相关性逐渐加强,降水对低海拔区域急尖长苞冷杉径向生长的影响更显著,而高海拔区域急尖长苞冷杉的径向生长表现出对气温升高的正响应,生长速率有所增加。

3)低海拔区域急尖长苞冷杉径向生长对气候变暖的响应呈现出较为明显的时间滞后性,随海拔升高,滞后效应逐渐减弱。

[参考文献]

[1] D'ARRIGO R,WILSON R,LIEPERT B,et al. On the 'divergence problem' in northern forests:a review of the tree-ring evidence and possible causes [J]. Global and Planetary Change,2008,60(3/4):289-305.

[2] 高琳琳,勾晓华,邓洋,等. 树轮气候学中分异现象的研究进展[J]. 冰川冻土,2011,33(2):453-460.
GAO L L,GOU X H,DENG Y,et al. An overview of the divergence phenomenon in dendroclimatology [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2011,33(2):453-460.

[3] 盖学瑞,于大炮,王守乐,等. 树轮-气候"分异问题"形成机制的研究进展[J]. 生态学杂志,2017,36(11):3273-3280.
GAI X R,YU D P,WANG S L,et al. A review of formation mechanism on the 'divergence problem' of tree growth-climate relationship [J]. Chinese Journal of Ecology,2017,36(11):3273-3280.

[4] TAYNIK A V,BARINOV V V,OIDUPAA O C,et al. Growth coherency and climate sensitivity of *Larix sibirica* at the upper treeline in the Russian Altai-Sayan Mountains [J]. Dendrochronologia,2016,39:10-16.

[5] BARBER V A,JUDAY G P,FINNEY B P. Reduced growth of Alaskan white spruce in the twentieth century from temperature-induced drought stress [J]. Nature,2000,405(6787):668-673.

[6] D'ARRIGO R D,KAUFMANN R K,DAVI N,et al. Thresholds for warming-induced growth decline at elevational tree line in the Yukon Territory,Canada [J]. Global Biogeochemical Cycles,2004,18(3):GB3021.

[7] PISARIC M F J,CAREY S K,KOKELJ S V,et al. Anomalous 20th century tree growth,Mackenzie Delta,Northwest Territories,Canada [J]. Geophysical Research Letters,2007,34(5):L05714.

[8] JACOBY G C,LOVELIUS N V,SHUMILOV O I,et al. Long-term temperature trends and tree growth in the taymir region of northern Siberia [J]. Quaternary Research,2000,53(3):312-318.

[9] HUANG Y Q,DENG X W,ZHAO Z H,et al. Monthly radial growth model of Chinese fir(*Cunninghamia lanceolata*(Lamb.)Hook.),and the relationships between radial increment and climate factors [J]. Forests,2019,10(9):757.

[10] 胡实,赵茹欣,贾仰文,等. 中国典型山地植被垂直地带性特征及其影响要素[J]. 自然杂志,2018,40(1):12-16.
HU S,ZHAO R X,JIA Y W,et al. The characteristic of vegetation vertical zonality and the influential factors in typical mountains in China [J]. Chinese Journal of Nature,2018,40(1):12-16.

[11] LIU L S,SHAO X M,LIANG E Y. Climate signals from tree ring chronologies of the upper and lower treelines in the Dulan Region of the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Journal of Integrative Plant Biology,2006,48(3):278-285.

[12] DANG H S,JIANG M X,ZHANG Q F,et al. Growth responses of subalpine fir (*Abies fargesii*) to climate variability in the Qinling Mountain,China [J]. Forest Ecology and Management,2007,240(1/2/3):143-150.

[13] KANG S C,XU Y W,YOU Q L,et al. Review of climate and cryospheric change in the Tibetan Plateau [J]. Environmental Research Letters,2010,5(1):015101.

[14] 史继清,甘臣龙,边多,等. 1981-2015年西藏全区气候季节的变化[J]. 冰川冻土,2018,40(6):1110-1119.
SHI J Q,GAN C L,BIAN D,et al. Variation of seasons in Tibet Autonomous Region from 1981 to 2015 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2018,40(6):1110-1119.

[15] SHI C M,SCHNEIDER L,HU Y,et al. Warming-induced unprecedented high-elevation forest growth over the monsoonal Tibetan Plateau [J]. Environmental Research Letters,2020,

15(5)：054011.

[16] DUAN J P，LI L，FANG Y J. Seasonal spatial heterogeneity of warming rates on the Tibetan Plateau over the past 30 years [J]. Scientific Reports，2015，5：11725.

[17] 王超，卢杰，郑维列，等. 急尖长苞冷杉研究概况 [J]. 高原农业，2021，5(4)：338-352.
WANG C，LU J，ZHENG W L，et al. Research Status of *Abies georgei* var. *smithii* [J]. Journal of Plateau Agriculture，2021，5(4)：338-352.

[18] LIANG E Y，WANG Y F，ECKSTEIN D，et al. Little change in the fir tree-line position on the southeastern Tibetan Plateau after 200 years of warming [J]. New Phytologist，2011，190(3)：760-769.

[19] LIANG E Y，SHAO X M，XU Y. Tree-ring evidence of recent abnormal warming on the southeast Tibetan Plateau [J]. Theoretical and Applied Climatology，2009，98(1)：9-18.

[20] LI X X，LIANG E Y，GRIČAR J，et al. Critical minimum temperature limits xylogenesis and maintains treelines on the southeastern Tibetan Plateau [J]. Science Bulletin，2017，62(11)：804-812.

[21] LIANG E Y，WANG Y F，XU Y，et al. Growth variation in *Abies georgei* var. *smithii* along altitudinal gradients in the Sygera Mountains，southeastern Tibetan Plateau [J]. Trees，2010，24(2)：363-373.

[22] 罗伦，旦增，朱立平，等. 藏东南色季拉山气温和降水垂直梯度变化 [J]. 高原气象，2021，40(1)：37-46.
LUO L，DAN Z，ZHU L P，et al. Vertical gradient changes of temperature and precipitation in the Sygera Mountains，southeastern Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology，2021，40(1)：37-46.

[23] 高郯，李江荣，卢杰，等. 色季拉山急尖长苞冷杉林不同坡向土壤养分及肥力研究 [J]. 生态学报，2020，40(4)：1331-1341.
GAO T，LI J R，LU J，et al. Soil nutrient and fertility of different slope directions in the *Abies georgei* var. *smithii* forest in Sejila Mountain [J]. Acta Ecologica Sinica，2020，40(4)：1331-1341.

[24] GRISSINO-MAYER H D. Evaluating crossdating accuracy：a manual and tutorial for the computer program COFECHA [J]. Tree-Ring Research，2001，57(2)：205-221.

[25] 于德水，卢杰，张萌，等. 西藏色季拉山西藏红杉径向生长对气温和降水波动的响应 [J]. 林业科学研究，2023，36(1)：91-99.
YU D S，LU J，ZHANG M，et al. Response of radial growth of *Larix griffithii* to temperature and precipitation fluctuation in Tibet Shergyla Mountain [J]. Forest Research，2023，36(1)：91-99.

[26] COOK E R，PETERS K. The smoothing spline：a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies [J]. Tree-ring Bulletin，1981，41：45-53.

[27] 吴祥定，邵雪梅. 采用树轮宽度资料分析气候变化对树木生长量影响的尝试 [J]. 地理学报，1996，51(S1)：92-101.
WU X D，SHAO X M. A preliminary study on impact of climate change on tree growth using tree ring-width data [J]. Acta Geographica Sinica，1996，51(S1)：92-101.

[28] 王婷，于丹，李江风，等. 树木年轮宽度与气候变化关系研究进展 [J]. 植物生态学报，2003，27(1)：23-33.
WANG T，YU D，LI J F，et al. Advances in research on the relationship between climatic change and tree-ring width [J]. Acta Phytoecologica Sinica，2003，27(1)：23-33.

[29] 阎弘，孙滢洁，周婉莹，等. 大兴安岭不同纬度兴安落叶松生长对干旱适应性及生长衰退的差异 [J]. 生态学报，2023，43(10)：3958-3970.
YAN H，SUN Y J，ZHOU W Y，et al. Distinctions in drought adaptability and growth decline of *Larix gmelinii* at different latitudes in Greater Khingan Mountains [J]. Acta Ecologica Sinica，2023，43(10)：3958-3970.

[30] HIRSCH R M，SLACK J R. A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence [J]. Water Resources Research，1984，20(6)：727-732.

[31] 杨耀先，胡泽勇，路富全，等. 青藏高原近 60 年来气候变化及其环境影响研究进展 [J]. 高原气象，2022，41(1)：1-10.
YANG Y X，HU Z Y，LU F Q，et al. Progress of recent 60 years' climate change and its environmental impacts on the Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology，2022，41(1)：1-10.

[32] 蔡苗，于德水，卢杰. 色季拉山贡布红杉径向生长对气温及降水的分异响应 [J]. 西北林学院学报，2024，39(1)：117-124.
CAI M，YU D S，LU J. Divergent responses of radial growth of *Larix kongboensis* to temperature and precipitation in the Shergyla Mountain [J]. Journal of Northwest Forestry University，2024，39(1)：117-124.

[33] GAIRE N P，ZAW Z，BRÄUNING A，et al. The impact of warming climate on Himalayan silver fir growth along an elevation gradient in the Mt. Everest region [J]. Agricultural and Forest Meteorology，2023，339：109575.

[34] 周子建，江源，董满宇，等. 长白山北坡不同海拔红松径向生长-气候因子关系对气温突变的响应 [J]. 生态学报，2018，38(13)：4668-4676.
ZHOU Z J，JIANG Y，DONG M Y，et al. Response of the relationship between radial growth and climatic factors to abrupt change of temperature along an altitudinal gradient on the northern slope of Changbai Mountain，Northeast China [J]. Acta Ecologica Sinica，2018，38(13)：4668-4676.

[35] 陈力，尹云鹤，赵东升，等. 长白山不同海拔树木生长对气候变化的响应差异 [J]. 生态学报，2014，34(6)：1568-1574.
CHEN L，YIN Y H，ZHAO D S，et al. Climate response of tree growth along an altitudinal gradient in the Changbai Mountains，Northeast China [J]. Acta Ecologica Sinica，2014，34(6)：1568-1574.

[36] 辛福梅，刘济铭，杨小林，等. 色季拉山急尖长苞冷杉叶片及细根性状随海拔的变异特征 [J]. 生态学报，2017，37(8)：2719-2728.
XIN F M，LIU J M，YANG X L，et al. Variation in leaf and fine root traits with altitude in *Abies georgei* var. *smithii* in

Mt. Shergyla [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(8): 2719-2728.

[37] 王延芳,张永香,勾晓华,等.祁连山中部低海拔地区青海云杉径向生长的气候响应机制[J].生态学报,2020,40(1):161-169.
WANG Y F,ZHANG Y X,GOU X H,et al. Climate response mechanism of radial growth of *Picea crassifolia* in low altitude area of middle Qilian Mountains [J]. Acta Ecologica Sinica,2020,40(1):161-169.

[38] 彭钟通,郭明明,张远东,等.升温突变对川西道孚林线川西云杉和鳞皮冷杉生长的影响[J].生态学报,2021,41(20):8202-8211.
PENG Z T,GUO M M,ZHANG Y D,et al. Effects of abrupt warming on *Picea likiangensis* var. *balfouriana* and *Abies squamata* growth at tree line in Daofu,Sichuan,China [J]. Acta Ecologica Sinica,2021,41(20):8202-8211.

[39] 王红,段爱国,张建国.不同种源树木径向生长对气候变化响应研究进展[J].林业科学研究,2023,36(5):198-204.
WANG H,DUAN A G,ZHANG J G. Response of radial growth of different provenances to climate change:a review [J]. Forest Research,2023,36(5):198-204.

[40] 蔡礼蓉,匡旭,房帅,等.长白山阔叶红松林3个常见树种径向生长的影响因素[J].应用生态学报,2017,28(5):1407-1413.
CAI L R,KUANG X,FANG S,et al. Factors influencing tree radial growth of three common species in broad-leaved Korean pine mixed forests in Changbai Mountains,China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2017,28(5):1407-1413.

[41] ZHANG H Y,CAI Q F,LIU Y. Altitudinal difference of growth-climate response models in the north subtropical forests of China [J]. Dendrochronologia,2022,72:125935.

[42] 张远东,庞瑞,顾峰雪,等.西南高山地区水分利用效率时空动态及其对气候变化的响应[J].生态学报,2016,36(6):1515-1525.
ZHANG Y D,PANG R,GU F X,et al. Temporal-spatial variations of WUE and its response to climate change in alpine area of south Western China [J]. Acta Ecologica Sinica,2016,36(6):1515-1525.

[43] ZHANG Y D,GUO M M,WANG X C,et al. Divergent tree growth response to recent climate warming of *Abies faxoniana* at alpine treelines in east edge of Tibetan Plateau [J]. Ecological Research,2018,33(2):303-311.

[44] 郭明明,张远东,王晓春,等.升温突变对川西马尔康树木生长的影响[J].生态学报,2015,35(22):7464-7474.
GUO M M,ZHANG Y D,WANG X C,et al. Effects of abrupt warming on main conifer tree rings in Markang,Sichuan,China [J]. Acta Ecologica Sinica,2015,35(22):7464-7474.

[45] 郭滨德,张远东,王晓春.川西高原不同坡向云、冷杉树轮对快速升温的响应差异[J].应用生态学报,2016,27(2):354-364.
GUO B D,ZHANG Y D,WANG X C. Response of *Picea purpurea* and *Abies faxoniana* tree rings at different slope aspects to rapid warming in western Sichuan,China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2016,27(2):354-364.

[46] LLOYD A H,FASTIE C L. Spatial and temporal variability in the growth and climate response of treeline trees in Alaska [J]. Climatic Change,2002,52(4):481-509.

[47] JIAO L,WANG S,CHEN K,et al. Dynamic response to climate change in the radial growth of *Picea schrenkiana* in western Tien Shan,China [J]. Journal of Forestry Research,2022,33(1):147-157.

[48] 韩艳刚,盖学瑞,邱思玉,等.大兴安岭兴安落叶松径向生长对气候响应的时空变化[J].应用生态学报,2021,32(10):3397-3404.
HAN Y G,GAI X R,QIU S Y,et al. Spatial and temporal variations of the responses of radial growth of *Larix gmelinii* to climate in the Daxing'anling Mountains of Northeast China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2021,32(10):3397-3404.

[49] 王瑞红,潘刚,张新军,等.色季拉山急尖长苞冷杉幼苗天然更新的影响因子研究[J].浙江农林大学学报,2021,38(3):652-658.
WANG R H,PAN G,ZHANG X J,et al. Natural regeneration factors of *Abies georgei* var. *smithii* seedlings in Sejila Mountain [J]. Journal of Zhejiang A&F University,2021,38(3):652-658.

[50] 张文涛,江源,王明昌,等.芦芽山阳坡不同海拔华北落叶松径向生长对气候变化的响应[J].生态学报,2015,35(19):6481-6488.
ZHANG W T,JIANG Y,WANG M C,et al. Responses of radial growth in *Larix principis-rupprechtii* to climate change along an elevation gradient on the southern slope of Luya Mountain [J]. Acta Ecologica Sinica,2015,35(19):6481-6488.

[51] GAO S,LIANG E Y,LIU R S,et al. An earlier start of the thermal growing season enhances tree growth in cold humid areas but not in dry areas [J]. Nature Ecology & Evolution,2022,6(4):397-404.

[52] WANG Y F,ČUFAR K,ECKSTEIN D,et al. Variation of maximum tree height and annual shoot growth of Smith fir at various elevations in the Sygera Mountains,southeastern Tibetan Plateau [J]. PLoS One,2012,7(3):e31725.

[53] 李永霞,索郎拉措,杨小林.急尖长苞冷杉叶片结构和光合特性对海拔高度的响应[J].厦门大学学报(自然科学版),2018,57(4):503-509.
LI Y X,SUOLANG L C,YANG X L. Response of leaf structure and photosynthetic characteristics of *Abies georgei* var. *smithii* to altitudes [J]. Journal of Xiamen University (Natural Science),2018,57(4):503-509.

[54] FRANCESCHINI T,BONTEMPS J D,PEREZ V,et al. Divergence in latewood density response of Norway spruce to temperature is not resolved by enlarged sets of climatic predictors and their non-linearities [J]. Agricultural and Forest Meteorology,2013,180:132-141.

(下转第108页)

Plant Biology,2000,27(6):595-607.

[29] 徐飞,郭卫华,徐伟红,等.刺槐幼苗形态、生物量分配和光合特性对水分胁迫的响应[J].北京林业大学学报,2010,32(1):24-30.
XU F,GUO W H,XU W H,et al. Effects of water stress on morphology,biomass allocation and photosynthesis in *Robinia pseudoacacia* seedlings[J]. Journal of Beijing Forestry University,2010,32(1):24-30.

[30] 李春燕,王进鑫,薛设.干旱及复水对侧柏幼苗叶片抗氧化酶活性的影响[J].西北林学院学报,2015,30(2):33-37,58.
LI C Y,WANG J X,XUE S. Effect of drought and rewatering on the activity of protect enzymes in the leaves of *Platycladus orientalis* seedings[J]. Journal of Northwest Forestry University,2015,30(2):33-37,58.

[31] 胡杨,李钢铁,李星,等.干旱胁迫对细穗柽柳幼苗生长和生理生化指标的影响[J].中国农业科技导报,2021,23(6):43-50.
HU Y,LI G T,LI X,et al. Growth and physiological index of *Tamarix leptostachys* Bunge seedlings under soil drought stress[J]. Journal of Agricultural Science and Technology,2021,23(6):43-50.

[32] 赵英,赵凯丽,朱宇林,等.干旱胁迫与复水对喀斯特地区红背山麻杆生长及生理特性的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2023,51(8):59-68.
ZHAO Y,ZHAO K L,ZHU Y L,et al. Effects of drought stress and re-watering on growth and physiology characteristics of *Alchornea trewioides* in Karst areas[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition),2023,51(8):59-68.

[33] 金思雨,彭祚登.刺槐苗木碳水生理参数对长期干旱及复水的响应变化[J].北京林业大学学报,2023,45(8):43-56.
JIN S Y,PENG Z D. Changes in response of carbon and water physiological parameters of *Robinia pseudoacacia* seedlings to long-term drought and rehydration[J]. Journal of Beijing Forestry University,2023,45(8):43-56.

[34] BRADSHAW A D. Unravelling phenotypic plasticity:why should we bother? [J]. New Phytologist,2006,170(4):644-648.

[35] NICOTRA A B,ATKIN O K,BONSER S P,et al. Plant phenotypic plasticity in a changing climate[J]. Trends in Plant Science,2010,15(12):684-692.

(责任编辑:陈丽)

(上接第98页)

[55] 郭滨德,王晓春,张远东.阈值温度和积温对川西高原林线岷江冷杉径向生长的影响[J].生态学报,2019,39(3):895-904.
GUO B D,WANG X C,ZHANG Y D. Effects of accumulated and threshold temperatures on the radial growth of *Abies faxoniana* in the alpine timberline,Western Sichuan Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(3):895-904.

[56] SALOMÓN R L,PETERS R L,ZWEIFEL R,et al. The 2018 European heatwave led to stem dehydration but not to consistent growth reductions in forests [J]. Nature Communications,2022,13(1):28.

[57] 张鹏翼,梁宇,马天啸,等.长白山区域森林主要树种迁移动态对气候变化的滞后响应[J].生态学杂志,2022,41(9):1674-1682.
ZHANG P Y,LIANG Y,MA T X,et al. The migration of main tree species lags behind climate change in Changbai Mountains [J]. Chinese Journal of Ecology,2022,41(9):1674-1682.

(责任编辑:窦春蕊)